

---

## Kurzfassung

---

Name: Tobias Kälker  
Thema: Methoden zur quantitativen Untersuchung des Einflusses von Straßenraumtypen auf die Belastungsintensität durch Luftschadstoffe  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze  
M.Eng. Karin Menges

Das Thema Luftschadstoffe hat in der öffentlichen Diskussion in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Insbesondere nach dem Aufdecken des sogenannten „Diesel-Abgasskandals“ stehen Luftschadstoffmessungen in den deutschen Großstädten unter besonderer Aufmerksamkeit. Der schädliche Einfluss der vom Verkehr emittierten Luftschadstoffe auf die allgemeine Gesundheit des Menschen ist in wissenschaftlichen Fachkreisen anerkannt und in zahlreichen Studien hinreichend validiert. Während die Zahl der Todesfälle durch Verkehrsunfälle in Deutschland weiter abnimmt, schätzen wissenschaftliche Studien die Zahl der Todesfälle, verursacht durch Exposition von Luftschadstoffen, inzwischen deutlich höher ein. Viele Großstädte in Deutschland verfehlen seit Jahren bestehende Grenzwerte zu den Stickstoffoxiden und Feinstäuben und müssen sich daher zunehmend mit gerichtlich festgelegten Sanktionen auseinandersetzen. Diese Sanktionen, welche vorrangig den Verkehr als einen der Hauptemittenten von Luftschadstoffen in Form von Fahrverboten einzelner Antriebsklassen betreffen, belasten Städte und Bürger gleichermaßen. Städte und Gemeinden sind daher gezwungen, Maßnahmen gegenüber den hohen Luftschadstoffbelastungen zu treffen, um die Gesundheit ihrer Bürger und Bürgerinnen zu schützen.

Die einzelnen Gründe der hohen verkehrsrelevanten Luftschadstoffbelastungen in Städten sind individuell und resultieren häufig aus städtebaulichen und verkehrsplanerischen Strukturen. Unter anderem beeinflusst die Stadtplanung durch Bebauungsdichte und Bebauungsstruktur die Luftzirkulation in Städten. Um geeignete Maßnahmen gegenüber den Luftschadstoffbelastungen zu treffen, müssen daher zunächst mögliche Einflussfaktoren identifiziert und definiert werden. Ziel dieser Arbeit ist es, neue Erkenntnisse zu möglichen Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung zu sammeln und Methoden, mit denen der Einfluss verschiedener Straßenraumtypen auf die Luftschadstoffbelastung quantifiziert werden können, zu identifizieren und zu bewerten. Im Anschluss sollen Empfehlungen für eine gesundheitsorientierte Straßenraumgestaltung gegeben werden. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen gliedert sich diese Masterarbeit in einen Grundlagen-, Analyse- und Konzeptionsteil. Der Grundlagenbereich dient als Einstieg in die Themen Luftschadstoffe und Straßenraumgestaltung. Auf dieses Grundgerüst aufbauend, folgt die Definition möglicher Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung, einschließlich einer Gegenüberstellung priorisierter Einflussfaktoren für diese Arbeit. Die vorläufigen Zwischenergebnisse dieser Literaturrecherchen werden dann im nächsten Schritt durch eine Datenanalyse der Kennwerte vorhandener Luftschadstoffmessstationen überprüft, mit dem Ziel, Übereinstimmungen bzw. bestehende Lücken in Zusammenhängen von Einflussfaktoren und Straßenraumtypen zu identifizieren. Diese Lücken werden abschließend durch eine eigene angefertigte Konzeption ergänzender Messungen geschlossen.

Kapitel 2 behandelt die Grundlagen zur Luftschadstoffbelastung. Luftschadstoffe werden gas- oder partikelförmig in die Atmosphäre emittiert. Zwar wirken Schadstoffe zu einem gewissen Anteil am Entstehungsort, aber ein Großteil der emittierten Schadstoffe tritt an anderer Stelle in die Umwelt ein. Der Anteil des Verkehrs an der Luftschadstoffbelastung in Deutschland schwankt je nach Schadstoff

---

unterschiedlich stark. Der Verkehr besitzt einen hohen Anteil an den Schadstoffemissionen des Kohlendioxids, der Feinstäube und der Stickstoffoxiden. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die beiden letztgenannten Schadstoffe. Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) entstehen im Verbrennungsprozess des Kraftstoffs im Motor und führen aufgrund ihrer giftigen Wirkung in hoher Konzentration zu Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen. Feinstäube werden je nach Form und Größe in verschiedene Klassen unterteilt ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_{0,1}$ ) und gelangen durch Verbrennungsprozesse im Motor, Brems- und Reifenabrieb und durch Aufwirbelungen in die Umwelt. Je kleiner der Feinstaub, desto tiefer dringt der Partikel in den menschlichen Körper ein und verursacht unterschiedliche Schädigungen an Lunge, Herz und Blutgefäßen. Um diese schädliche Wirkungen einzudämmen, wurden in den letzten Jahrzehnten mehrere Erlasse auf nationaler und internationaler Ebene beschlossen. Das 39. Bundes-Immissionsschutzgesetz definiert zur Einhaltung der Lufthygiene verbindliche Grenzwerte für Stickstoffdioxid und Feinstaub. Das Kapitel schließt mit einer Darstellung der angewendeten Methodik zur direkten Erfassung immissionsbezogener Kenngrößen in Deutschland ab.

Im dritten Abschnitt der Arbeit werden allgemeine Grundsätze zur Straßenraumgestaltung untersucht. Der Begriff der Straße wird definiert und die Bestandteile eines Straßenquerschnitts kurz vorgestellt. Die Verkehrsstraße unterliegt in der Regel keinem einheitlichen Standard, sondern wird geprägt von der individuellen Situation am Ort und dem historischen Kontext. Andererseits prägen Parameter wie Funktionen, Nutzungen und Verkehrsstärken den öffentlichen Raum und geben ihm Gestalt. Dementsprechend besitzen Straßen eine individuelle Belastungsintensität durch Luftschadstoffe. Gleichzeitig lassen sich Straßen, trotz ihrer individuellen Ausprägung, in verkehrliche und städtebauliche Merkmalen einteilen, sodass bestimmte wiederkehrende Merkmale eine Einteilung in Straßentypen ermöglichen. Die „Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen“ definiert 12 Entwurfssituationen für Stadtstraßen unter Berücksichtigung mehrerer vordefinierter Parameter zur Einteilung in die jeweilige Entwurfssituation. Die Richtlinie berücksichtigt den Nutzungsanspruch der Verkehrsteilnehmer, die jeweilige Straßenraumbreite sowie weitere angewandte Entwurfsgrundsätze, welche insbesondere die Führung der Verkehrsmittel und Mindestmaße der Bestandteile des Straßenquerschnitts betreffen. Diese Parameter der Richtlinie bilden eine theoretische Grundlage für die Anfertigung eigens definierter Straßenraumtypen für die Datenanalyse in Kapitel 5.

Den letzten Grundlagenteil bilden die Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung. Diese Einflussfaktoren lassen sich in drei größere Einflusskategorien zusammenfassen: Meteorologisch, Verkehrlich und Städteplanerisch-baulich. Die Literaturrecherche zu den meteorologischen Einflussfaktoren zeigt eine Beeinflussung der Belastungsintensität von Luftschadstoffen durch die Faktoren Wind, Niederschlag und Luftdruck. Insbesondere hohe Windgeschwindigkeiten und Niederschlagsereignisse führen zu einer Verdünnung bzw. Auswaschung der Luftschadstoffe in der Atmosphäre. Die nächste Kategorie bilden die Verkehrsemissionen bzw. Faktoren, welche einen verkehrlichen Hintergrund besitzen. Grundsätzlich geht ein erhöhtes Verkehrsaufkommen mit einer erhöhten Luftschadstoffbelastung einher. Dieselmotoren stoßen gegenüber anderen Antriebsarten einen dominierenden Anteil an Luftschadstoffen aus. Verkehrsfluss und Geschwindigkeit beeinflussen die Belastungsphasen des Motors, sodass je nach Zustand ein variierender Ausstoß an Abgasen emittiert wird. Die Städteplanerisch-baulichen Einflussfaktoren sind abhängig von den jeweiligen Gegebenheiten vor Ort. Sie beschreiben die Einflüsse unveränderlicher oder schwer veränderlicher Elemente, wie die Randbebauung, Topographie oder Straßenbreite. Sie beeinflussen die Ausbreitung der Luftschadstoffe durch ihre physische Form und korrelieren mitunter stark mit meteorologischen Parametern. Elemente der Vegetation ergänzen diese Faktoren.

---

Im darauffolgenden Kapitel erfolgt die Datenanalyse zur Luftschadstoffbelastung im Jahr 2019 in ausgewählten Straßen mit stationären Messstationen in Deutschland. Die angewandte Methodik zur Datenanalyse enthält eine Multiple Regression, um den Einfluss mehrerer unabhängiger Variablen (die Einflussfaktoren) auf eine abhängige Variable (der Luftschadstoff) zu analysieren. Das Kapitel enthält eine Darstellung der Datenherkunft und beschreibt den Aufbau des verwendeten Modells. Die ausgewählten Straßen werden hinsichtlich vordefinierter Kriterien in einzelne Straßenraumtypen unterschieden. Insgesamt erfolgt die Einteilung der untersuchten Straßen in vier verschiedene Straßenraumtypen: Straßenschlucht, Boulevard, Aufgelockert und Offen. Die Einteilungsgrundlage basiert auf unterschiedlichen Ausprägungen der Bebauung (Maß, Symmetrie, Verhältnis zu Breite), Straßenraumbreite und Vegetationsgrad. Die meteorologische Datenanalyse bestätigt einige Ergebnisse der Literaturrecherche zu den meteorologischen Einflussfaktoren. Eine Abnahme der Belastungsintensität bei erhöhter Windgeschwindigkeit und einem Niederschlagsereignis konnte beobachtet werden. Die Datenanalyse zu den anderen Einflussfaktoren zeigt unabhängig vom jeweiligen Straßenraumtyp einen Einfluss der Verkehrsstärke, Vegetation und der Positionierung der Messstationen an verkehrsreichen Kreuzungen. Interessant sind die Erkenntnisse zur Vegetation. Ein allgemeiner positiver Einfluss der Vegetation auf die Luftschadstoffbelastung kann durch eine ungünstige Anordnung im Straßenraum negiert werden. Die untersuchten Straßen, die dem Straßenraumtyp Straßenschlucht zugeordnet worden sind, besitzen die höchsten Belastungswerte. Aufgelockerte und hinsichtlich der Straßenraumbreite großzügiger bemessene Straßen weisen im Vergleich zur Straßenschlucht niedrigere Belastungswerte auf. Offene Strukturen besitzen die niedrigsten Belastungswerte. Eine ergänzende Betrachtung der Ausreißer verstärkt den in der Datenanalyse gewonnenen Eindruck, dass je nach Bebauungsform, Verkehrsstärke und Vegetationsgrad differenzierte Belastungsintensitäten in verschiedenen Straßenraumtypen entstehen.

Auf Basis der erlangten Erkenntnisse aus den Datenanalysen wird im Kapitel 6 eine Konzeption ergänzender Messungen vorgestellt. In einem ersten Schritt werden alle Einflussfaktoren nach ihrer Realisierbarkeit für eine Messung bewertet, um in einem zweiten Schritt geeignete Kombinationsmöglichkeiten zu generieren. Diese Kombinationsmöglichkeiten gliedern sich in ein Hauptmerkmal (Straßenraumtyp) und verschiedene Unterscheidungsmerkmale (z.B. Vegetationsdichte, Straßenzustand). Je nach Ausprägung ergeben sich so unterschiedliche Konstellationen. Ziel ist es, Informationen zu einer breiten Auswahl an unterschiedlichen Straßenraumtypen mit unterschiedlichen Merkmalausprägungen zu erlangen, um auf diese Weise besser festzustellen, welcher Einflussfaktor unter bestimmten Bedingungen besonders hervortritt. Zur Überprüfung des Konzepts werden 5 unterschiedliche Messpunkte in Frankfurt am Main eingerichtet. Eine Durchführung der Messungen, Interpretation der Ergebnisse und Evaluation zum Konzept konnte infolge der COVID-19-Pandemie, nicht vollzogen werden. Stattdessen wird eine potenzielle Weiterentwicklung des erstellten Modells hinsichtlich Messhöhe, Messstandort und Berücksichtigung Porosität in der Bebauung angeregt.

Als Empfehlung für eine gesundheitsorientierte Straßenraumgestaltung werden im Wesentlichen die Ergebnisse der Datenanalyse herangezogen. Grundsätzlich führen Verringerungen der Verkehrsstärke und eine Harmonisierung des Verkehrsflusses zu einer Veränderung in der Luftschadstoffbelastung. Eine offene Gestaltung des Straßenraums unter Berücksichtigung eines kontinuierlichen Luftaustauschs ist zu empfehlen. Dies schließt eine Überprüfung der angepflanzten Vegetation hinsichtlich ihrer Eigenschaft als potenzielles Strömungshindernis mit ein. An dieser Stelle werden mögliche Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschungen gesehen.

---

## Abstract

---

Name: Tobias Kälker  
Topic: Methods for Quantitative Analysis of the Influence of Road Types on Air Pollution Intensities  
Advisor: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze  
M.Eng. Karin Menges

The issue of air pollutants has become significantly more important in public discussion in recent years. Particularly after the so-called "diesel exhaust scandal" has been uncovered, air pollutant measurements stand in the German cities under special attention. The harmful influence of air pollutants emitted by traffic on general human health is recognised by scientific circles and has been validated in numerous studies. While the number of deaths from traffic accidents in Germany continues to decline, scientific studies now estimate the number of deaths caused by exposure to air pollutants to be significantly higher. Many large cities in Germany have been missing the limits on nitrogen oxides and particulate matter for years and have to deal with judicially imposed sanctions. These sanctions, which primarily affect traffic as one of the main emitters of air pollutants in the form of driving bans in individual drive classes, are a burden cities and citizens alike. Cities and municipalities are forced to take measures against the high levels of air pollution in order to protect the health of their citizens.

The individual reasons for the high traffic-relevant air pollutant in cities are individual and often result from urban development and traffic planning structures. Urban planning influences the air circulation in cities through building density and building structure. In order to take appropriate measures against air pollution, possible influencing factors must first be identified and defined. The aim of this work is to gather new knowledge on possible factors influencing air pollution and to identify and evaluate methods to quantify the influence of different road types on air pollution. This will be followed by recommendations for a health-oriented street design. In order to answer these questions, this master's thesis is divided into a basic, analysis and conceptual part. The basic part serves as an introduction to the topics air pollutants and road design. Based on this basic framework, the definition of possible influencing factors on air pollution follows, including a comparison of prioritized influencing factors for this work. The intermediate results of these literature searches are then examined in the next step by data analysis of the characteristic values of existing air quality measuring stations, with the aim of identifying matches or existing gaps in the context of influencing factors and types of road space. These gaps are finally closed by an own conception of supplementary measurements.

Chapter 2 deals with the basics of air pollution. Air pollutants are emitted into the atmosphere in gaseous or particulate form. Although pollutants act to a certain extent at the source, a large proportion of the pollutants emitted enter the environment elsewhere. Transport is responsible for a high proportion of the pollutant emissions of carbon dioxide, particulate matter and nitrogen oxides. This work focuses on the latter two pollutants. Nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) are produced in the combustion process of the fuel in the engine and lead to respiratory and cardiovascular diseases due to their toxic effect. Particulate Matter are divided into different classes ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_{0,1}$ ) depending on their shape and size and are released into the environment through combustion processes in the engine, road dust resuspension and abrasion. The finer a particle is, the deeper it can pass through the human body and causes various damages to the lungs, heart and blood vessels. In order to limit these harmful

---

effects, several regulations have been passed at national and international level in recent decades. The 39th German "Federal Immission Control Act" defines binding limit values for nitrogen dioxide and particulate matter. The chapter concludes with a presentation of the applied methodology for the direct recording of immission-related parameters in Germany.

The third part of the thesis examines general principles of road design. The concept of the road is defined and the components of a road's cross-section are presented. The traffic road is generally not subject to a uniform standard, but is shaped by the individual situation on site and the historical context. On the other hand, parameters such as functions, uses and traffic volume shape public space. Roads have an individual intensity of exposure to air pollutants. At the same time, despite their individual characteristics, roads can be divided into traffic and urban development characteristics, so that certain recurring characteristics can be classified into road types. The "Directives for the Design of Urban Roads" defines 12 design situations for urban roads, in consideration of several pre-defined parameters for classification into the respective design situation. The Directive takes into account the user's needs, the respective road space width and further applied design principles concerning the traffic management and the minimum dimensions of the components of the road cross-section. These parameters of the directive provide a theoretical basis for the preparation of specially defined road space types for the data analysis in chapter 5.

The last basic part contains the influencing factors on the level of air pollutants. Influencing factors can be summarized in three major influencing categories: meteorological, traffic and urban planning. The literature research on the meteorological influencing factors shows that the intensity of air pollutants is influenced by the factors wind, precipitation and air pressure. Especially high wind speeds and precipitation events lead to a dilution or dispersion of air pollutants in the atmosphere. The next category is traffic emissions or factors that have a traffic background. Basically, an increased traffic volume is accompanied by increased level of air pollutants. Compared with other types of propulsion, diesel engines emit a dominant proportion of air pollutants. Traffic flow and vehicle speed influence the load phases of the engine, so that varying exhaust gas emissions are emitted depending on the condition. The urban planning influencing factors depend on the respective local conditions. They describe the influences of unchangeable or difficult to change elements, such as built-up area, topography or road width. They influence the dispersion of air pollutants through their physical form and sometimes correlate strongly with meteorological parameters. Elements of vegetation complement these factors.

In the following chapter, the data analysis on air pollution in 2019 is carried out on selected roads with stationary air quality measuring stations in Germany. The data analysis methodology used includes multiple regressions to analyse the influence of several independent variables (the influencing factors) on one dependent variable (the air pollutant). The chapter contains a description of the data origin and describes the structure of the model used. The selected roads are differentiated into individual road space types according to predefined criteria. Overall, the examined roads are divided into four different types of road space: street canyon, boulevard, mixed loose development and open. The basis for classification is based on different characteristics of the development (size, symmetry, ratio to width), road width and degree of vegetation. The meteorological data analysis confirms some results of the literature research on meteorological factors. A decrease in air pollutants was observed with increased wind speed and a precipitation event. The data analysis of the other influencing factors shows an influence of traffic volume, vegetation and the positioning of the air quality measuring

---

stations at busy intersections regardless of the respective type of road space. The results on vegetation are interesting. A general positive influence of vegetation on air pollution can be negated by an unfavourable arrangement in street space. The examined roads, which have been assigned to the road space type street canyon, have the highest load values. Roads that are loosed up and dimensioned more generously in terms of road space width have lower load values in comparison to the street canyon. Open structures have the lowest load values of air pollutants. A supplementary consideration of the outliers reinforces the impression gained in the data analysis that, depending on the type of development, traffic volume and degree of vegetation, different intensities of air pollution arise in different road space types.

On the basis of the knowledge gained from the data analyzes, a conception of supplementary measurements is presented in Chapter 6. In a first step, all influencing factors are evaluated according to their feasibility for a measurement in order to generate suitable combination options in a second step. These combinations are divided into a main characteristic (road space type) and various distinguishing features (e.g. vegetation density, road condition). Depending on the characteristics, there are different constellations. The aim is to obtain information on a wide range of different road space types with different characteristic values in order to better determine which influencing factor is particularly significant under certain conditions. Five different measuring points will be set up to review the concept in Frankfurt am Main. As a result of the COVID-19 pandemic, it was not possible to carry out the measurements, interpret the results and evaluate the concept. Instead, a potential further development of the created model regarding measurement height, measurement location and consideration of porosity in the development is suggested.

The results of the data analysis are essentially used as a recommendation for a health-oriented street design. Basically, reductions in traffic volume and a harmonisation of traffic flow lead to a change in air pollution levels. An open design of the street space with consideration of a continuous air exchange is recommended. This includes a review of the vegetation planted in terms of its characteristics as a potential obstacle to flow. At this point possible starting points for further research are seen.